دانشکده مهندسی
گروه مکانیک

عنوان پایان‌نامه:

بررسی تأثیر سرد کردن قسمت مادون صوت جریان دوفازی بخار مایع آب به روش تحلیلی یک بعدی

نگارنده:

رامین مبینی

ارائه‌شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته

مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

استاد راهنمای اول:

دکتر سید محمدرضا مه پیکر

استاد راهنمای دوم:

دکتر احسان امیری راد

اسفندماه ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی
گروه مکانیک

عنوان پایان‌نامه:

بررسی تأثیر سرد کردن قسمت مادون صوت جریان دوفازی بخار مایع آب به روش تحلیلی یک بعدی

نگارنده:

رامین مبینی

ارائه‌شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته

مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

استاد راهنمای اول:

دکتر سید محمدرضا مه پیکر

استاد راهنمای دوم:

دکتر احسان امیری راد

اسفندماه ۱۳۹۲

تأییدیه

گواهی می‌شود که این پایان‌نامه تاکنون برای احراز یک درجه علمی ارائه نشده است و تمامی مطالب آن به جز مواردی که نام مرجع آورده شده است، نتیجه کار پژوهشی دانشجو می‌باشد.

دانشجو: رامین مبینی امضاء

تاریخ

استاد راهنمای اول: دکتر سید محمدرضا مه پیکر امضاء

تاریخ

استاد راهنمای دوم: دکتر احسان امیری راد امضاء

تاریخ

بسمه تعالی

دانشگاه فردوسی مشهد

صورت‌جلسه دفاع از پایان‌نامه کارشناسی ارشد

جلسه دفاع از پایان‌نامه آقای رامین مبینی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی مکانیک** گرایش تبدیل انرژی در ساعت ۱۵ روز **۱۳۹۲/۱۲/۲۱** در محل **کلاس ۱۳۱** دانشکده مهندسی با حضور امضاکنندگان ذیل تشکیل گردید. پس از بررسی‌های لازم، هیأت داوران پایان‌نامه نامبرده را با نمره به عدد ..... به حروف ..... و با **درجه** ..... مورد تأیید قرارداد.

عنوان رساله

بررسی تأثیر سرد کردن قسمت مادون صوت جریان دوفازی بخار مایع آب به روش تحلیلی یک بعدی

هیئت داوران امضا

- داور: دکتر اصغر برادران رحیمی

  استاد گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

- داور و نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر علیرضا تیمورتاش

  دانشیار گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

- استاد راهنمای اول: دکتر سید محمدرضا مه‌پیکر

  دانشیار گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

- استاد راهنمای دوم: دکتر احسان امیری راد

  استاد گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

- مدیر گروه: دکتر دکتر مسعود طهانی

  استاد گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

تقدیر و تشکر

سپاس فراوان از پدر و مادر عزیزم که متحمل سختی‌های فراوانی شدند و از تمام وجودشان مایه گذاشتند تا فرزندشان کمتر با سختی‌های زندگی دست به گریبان باشد.

همچنین تشکر ویژه از راهنمایی‌های همیشگی دکتر مه‌پیکر که همواره از هیچ کمکی دریغ نکردند.

چکیده فارسی

بسمه تعالی

مشخصات پایان‌نامه تحصیلی مقطع کارشناسی ارشد

دانشگاه فردوسی مشهد

عنوان پایان‌نامه: بررسی تأثیر سرد کردن قسمت مادون صوت جریان دوفازی بخار مایع آب به روش تحلیلی یک بعدی

نام نویسنده: رامین مبینی

نام استاد راهنمای اول: دکتر سید محمدرضا مه پیکر

نام استاد راهنمای دوم: دکتر احسان امیری راد

دانشکده: مهندسی	گروه: مکانیک	**رشته تحصیلی:** مهندسی
تاریخ تصویب:		**تاریخ دفاع:۹۲/۱۲/۲۱**
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد ● **دکتری** ○		**تعداد صفحات:** ۱۶۳

چکیده پایان‌نامه:

در طبقات کم فشار توربین‌های بخار مولد برق، جریان بخار آب در اثر عبور از بین پره‌ها تحت تأثیر پدیده جوانه‌زایی قرار می‌گیرد. از پیامدهای این پدیده افزایش ناگهانی فشار یا اصطلاحاً شوک میعان است. انتقال حرارت داخلی بازگشت‌ناپذیر موجب افت بازده توربین می‌گردد. از طرف دیگر قطرات آب تشکیل‌شده با شدت به دیواره پره‌های روتور برخورد می‌کنند. این مساله آسیب‌های جدی بر جای می‌گذارد. در این تحقیق این پدیده پیچیده بصورت یک جریان مافوق صوت غیرتعادلیِ بخار آب به همراه جوانه‌زایی و دوفازی شدن در یک کانال همگرا – واگرای یک بعدی به روش تحلیلی یا روش دقیق مدل‌سازی شده است. در این مدل یکی از پارامترهای مهم در حل دستگاه معادلات اصلیِ دینامیک گاز جریان دوفازی مذکور، مشخص کردن عدد ماخ است. مقادیر عدد ماخ بستگی به نحوه محاسبه سرعت صوت در جریان دوفازی دارد. در اکثر مقالات سرعت پخش صوت در فاز بخار بدون تأثیرگذاری فاز مایع محاسبه می‌شود. اما در این تحقیق سرعت پخش صوت با فرض تأثیرگذاری فاز مایع که باعث کاهش پخش صوت در جریان شده، به روش تقریبی محاسبه می‌شود. همچنین جریان غیر آدیاتیک با سرد کردن قسمت همگرای نازل همگرا – واگرا برای اولین بار مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش ۵ ٪ سرعت پخش صوت جواب‌های تئوری بدست آمده به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر می‌شوند؛ به عبارت دیگر جواب‌های مدل توسعه‌یافته واقعی‌تر می‌گردد؛ و از طرف دیگر با سرد کردن قسمت همگرا شوک میعان قوی تر رخ خواهد داد. که در این تحقیق میزان کمی تاثیر سرد کردن بر روی شوک میعان مشخص می‌شود.

کلید واژه:	امضای استاد راهنما
۱. جریان دوفازی ۲. جوانه زایی ۳. جریان غیر آدیاباتیک ۴. سرعت صوت ۵. عدد ماخ	تاریخ

نمادها			
نماد	نام فارسی	نام انگلیسی	واحد
A	مساحت	Area	m^2
B	ضرایب ویریالی	Virial coefficient	-
C	سرعت صوت	Speed of sound	$\frac{m}{s}$
C_P	ظرفیت حرارتی فشار ثابت	Constant pressure heat capacity	$\frac{J}{K.kg}$
C_v	ظرفیت حرارتی حجم ثابت	Constant volume heat capacity	$\frac{J}{K.kg}$
D_e	قطر هیدرولیکی	Hydraulic daiameter	m
f	ضریب اصطکاک	Friction fatcor	-
f_g	تمرکز g-mers	g-mers concentration	-
G,g	تابع گیبس	Gibbs function	kJ/kg

h	آنتالپی	Enthalpy	kJ / kg
j	نرخ جوانه زایی	Nucleation rate	$\frac{1}{m^3.\mathrm{s}}$
K	ضریب بولتزمان	Boltzman coefficient	-
Kn	عدد نادسن	Knudsen number	-
L	حرارت نهان	Latent Heat	kJ / kg
M,m	جرم	weight	kg
Ma	عدد ماخ	Mach Number	-
P	فشار	Pressure	kPa
Pr	پرانتل	prandtl	-
q_c	ضریب چگالش	Condensation coefficient	-
q_e	ضریب تبخیر	Evapouration coefficient	-
R	ثابت مخصوص بخار	Steam constant	$kJ / kMol.K$
s	آنتروپی مخصوص	Specific entropy	$kJ / kg.K$
T	دما	Temperature	K
t	زمان	Time	S
δt	گام زمانی	Step Time	S
U	سرعت	velocity	$m/.$
v	حجم مخصوص	Specific volume	$\frac{m^3}{kg}$

y	کسر رطوبت	Wetness Fraction	-
علائم یونانی			
نماد	**نام فارسی**	**نام انگلیسی**	**واحد**
α_g	نرخ تبخیر از g-mers	Vaporization of g-mers	Molecules/s
ζ	کسر خشکی	Dryness fraction	-
λ	ضریب هدایت حرارتی بخار	Vapour conduction coefficient	kJ/kg
μ	ویسکوزیته دینامیکی	Dynamic viscosity	$\frac{N.s}{m^2}$
π	عدد پی	Pie	-
ρ	چگالی	Density	$\frac{kg}{m^3}$
σ	کشش سطحی آب	Water surface tension	N/m
زیرنویس ها			
نماد	**نام فارسی**	**نام انگلیسی**	**واحد**
c	بحرانی بخار	Critical vapour	-
e	خروجی از المان	output of element	-
G	فاز بخار	Vapor phase	-
g	دسته مولکولی	g-mers	-

-	Inlet to element	ورودی به المان	i
-	Liquid phase	فاز مایع	L
-	saturated	اشباع	s
-	At time t	در زمان t	t
-	For flat plate	برای صفحه تخت	∞
بالا نویس‌ها			
واحد	**نام انگلیسی**	**نام فارسی**	**نماد**
-	Average	مقدار متوسط	-
-	Critical	بحرانی	*

فهرست

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱تاریخچه..... ۲

۱-۲ پدیده‌شناسی چگالش در جریان یک بعدی..... ۵

۱-۳ هدف پایان‌نامه..... ۹

فصل دوم: بررسی پدیده جوانه زایی

۲-۱ مقدمه..... ۱۱

۲-۲ جنبه‌های ترمودینامیکی جوانه زایی..... ۱۲

۲-۳ جنبه‌های سینماتیکی جوانه زایی..... ۱۶

۲-۴ تصحیحات معادله جوانه زایی کلاسیک..... ۲۱

۲-۴-۱ تصحیح کورتنی..... ۲۱

۲-۴-۲ تصحیح کانترویتز..... ۲۲

۲-۴-۳ تصحیح هال..... ۲۲

۲-۴-۴ نقش کشش سطحی..... ۲۳

فصل سوم: معادلات رشد قطره

۳-۱ مقدمه..... ۲۵

۳-۲ رژیم‌های مختلف جریان..... ۲۶

۳-۳ تحولات انتقال مولکولی آزاد..... ۲۷

۳-۲-۱ انتقال جرم..... ۲۷

۳-۲-۲ انتقال انرژی..... ۲۸

۳-۲-۳ انتقال تکانه ۲۹
۳-۴ تحولات انتقال پیوسته ۲۹
۳-۵ تحولات انتقال در ناحیه گذار ۳۱
۳-۶ حل معادلات رشد قطره ۳۳

فصل چهارم: معادلات دینامیک گاز جریان دوفاز

۴-۱ مقدمه ۳۶
۴-۲ معادلات دینامیک گاز جریان دوفازی ۳۷
۴-۲-۱ معادله بقای جرم ۳۸
۴-۲-۲ معادله حالت بخار ۳۸
۴-۲-۳ عدد ماخ فاز بخار ۳۹
۴-۲-۴ معادله تکانه ۳۹
۴-۲-۵ معادله انرژی ۴۰
۴-۳ تنظیم معادلات جریان ۴۱
۴-۴ محاسبه نرخ تشکیل مایع ۴۳
۴-۵ ترکیب عبارات جریان مایع با معادلات اصلی جریان ۴۷
۴-۶ انتگرال‌گیری معادلات جریان در نقطه صوتی ۴۸
۴-۷ موقعیت نقطه صوتی ۵۰
۴-۷-۱ تأثیر انتقال حرارت ۵۰
۴-۷-۲ تأثیر اصطکاک ۵۱
۴-۸ محاسبه دبی عبوری از شیپوره ۵۲
۴-۹ تعیین میزان آنتروپی در جریان دوفازی ۵۳
۴-۱۰ سرعت صوت و شرایط خفگی در جریان دوفازی ۵۷
۴-۱۱ تأثیرات انتقال حرارت ۵۷

فصل پنجم: بررسی نتایج

۵-۱ مقدمه ۶۲
۵-۲ نتایج جریان دوفازی مافوق صوت آدیاباتیک ۶۳
۵-۳ محاسبه آنتالپی سکون ۷۰
۵-۴ برسی تأثیرات عدد ماخ ۷۲
۵-۵ سرد کردن قسمت همگرای نازل همگرا – واگرا ۸۰

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱ نتیجه گیری ۱۰۳
۶-۲ پیشنهادات ۱۰۴

منابع ۱۰۶

پیوست الف : خواص مایع و بخار آب در حالت واقعی ۱۱۰

الف -۱ مقدمه ۱۱۱
الف -۲ معادله حالت بخار ۱۱۱
الف -۳ خواص ترمودینامیکی بخار فوق گرم ۱۱۳
الف -۳-۱ ظرفیت حرارتی در حجم ثابت ۱۱۳
الف -۳-۲ ظرفیت حرارتی در فشار ثابت ۱۱۳
الف -۳-۳ نمای آیزنتروپیک ۱۱۳
الف -۳-۴ آنتالپی و انرژی داخلی مخصوص ۱۱۴
الف -۳-۵ آنتروپی مخصوص ۱۱۴

الف -۴ خواص اشباع ۱۱۵
الف -۴-۱ آنتالپی تبخیر ۱۱۵
الف -۴-۲ فشار و درجه حرارت اشباع ۱۱۶
الف -۵ خواص مایع اشباع ۱۱۶
الف -۵-۱ حجم مخصوص مایع اشباع ۱۱۶
الف - ۵-۲ آنتالپی و آنتروپی مخصوص ۱۱۶
الف - ۵-۳ تنش سطحی ۱۱۷
الف -۶ خواص انتقال ۱۱۷
الف -۶-۱ ویسکوزیته دینامیکی ۱۱۷
الف -۶-۲ ضریب هدایت حرارتی ۱۱۷
الف -۷ خواص بخار فوق سرد ۱۱۸
الف -۸ رفتار خواص ترموفیزیکال در طول نازل همگرا واگرا ۱۱۸

پیوست ب: مجموعه نتایج آزمایشگاهی یک بعدی در فشار پایین ۱۲۳

ب -۱ مقدمه ۱۲۴
ب -۲ نازل بنی و وودز ۱۲۴
ب -۳ نازل کرول ۱۳۲
ب -۴ نازل اسکیلینگ ۱۳۶
ب -۵ نازل یانگ ۱۴۰
ب-۵-۱ نازل نوع A ۱۴۰
ب -۵-۲ نازل نوع B ۱۴۶
ب-۵-۳ نازل C ۱۴۸
ب -۶ ناز نوع M ۱۵۱

ب -۷ نازل نوع L ۱۵۱
ب -۸ نازل S ۱۵۵
ب -۹ نازل بنیی و گرین ۱۵۶
ب -۱۰ نازل مور ۱۶۱
فهرست مراجع مجموعه نتایج آزمایشگاهی ۱۶۳

۱ فصل اول: مقدمه

فصل اول: مقدمه

۱-۱ تاریخچه

مطالعات در باره جریان دوفاز از سال ۱۸۷۱ آغاز شد. اولین بار نظریه به وجود آمدن حالت فوق اشباع[۱] در انبساط بخار توسط تامسون[۲] مطرح شد. چهار سال بعد یعنی در سال ۱۸۷۵، کلوین[۳] رابطه بین فشار بخار متعادل روی یک سطح منحنی و شعاع آن را به دست آورد و مفاهیم اساسی سیستم‌های متعادل ترمودینامیکی توسط گیبس[۴] و هلم هولتز[۵] توسعه پیدا کرد. در ۱۸۸۰ آتکن[۶] مشاهده کرد که در هوای اشباع‌شده با بخار آب، ذرات خارجی و غبار موجود در جریان به عنوان هسته چگالش[۷] عمل می‌کند. در سال ۱۸۸۶ ون هلم هولتز تأثیرات ذرات یونیزه شده را روی انبساط بخار آبی که از یک شکاف باریک به داخل هوا تخلیه می‌شد بیان کرد. برای اولین بار ویلسون[۸] در سال ۱۸۹۷ یک مطالعه مفصل روی پدیده

[1] .Supersaturation
[2] . Thompson
[3] . Kelvin
[4] .Gibbs
[5] .Helmholtz
[6] .Aitken
[7] .Condensation
[8] .Wilson

چگالش انجام داد [۱]. بر اساس مشاهدات او در هوای اشباع‌شده با بخار آب بدون وجود هسته و ذرات خارجی، می‌توانست چگالش و تشکیل قطرات آب صورت گیرد. او نسبت فشار بخار P به فشار اشباع متقابل با درجه حرارت محلی بخار $P_s(T_G)$ را به عنوان انحراف سیال از حالت تعادلی آن معرفی نموده و آن را نسبت فوق اشباع[۱] S نامید؛ یعنی

$$S = \frac{P}{P_s(T_G)} \qquad (۱-۱)$$

سپس توسط هرتز[۲] و نادسن[۳] توصیف ریاضی چگالش روی یک قطره و یا تبخیر از آن فرموله شد. در سال ۱۹۱۳، هندرسون[۴][۲] گزارش داد که هنگام تخلیه بخار در نازل‌ها، انبساط در ناحیه مرطوب دیاگرام مولیر ٪۵ بیشتر از چیزی است که توسط محاسبات تعادلی انتظار می‌رفت و به دنبال آن استودولا[۵] با ذکر تجربیات بندمن[۶] بیان کرد که تخلیه ابتدایی بخار اشباع‌شده خشک مشابه حالت انبساط کاملاً خشک است [۳]. کالندر[۷] با استفاده از رابطه کلوین هلم هولتز اندازه قطرات را تعیین و در مورد اثرات فوق اشباع توضیحات مفصل‌تری ارائه داد. در سال ۱۹۱۸ خط ویلسون[۸] توسط مارتین[۹] بر روی دیاگرام مولیر رسم شده و انتهای محدوده فوق اشباع محاسبه گردید. سال‌ها بعد پدیده چگالش در شیپوره‌های همگرا – واگرا توسط یلوت[۱۰] (۱۹۳۴)، رتالیاتا[۱۱] (۱۹۳۶)، یلوت و هالند[۱۲] (۱۹۳۷) توسعه یافت. این محققان پیشنهاد کردند که ناحیه ویلسون جایگزین خط ویلسون شود. آنها معتقد بودند که انتهای منطقه فوق اشباع به شکل نازل و شرایط تجربی بستگی دارد. سپس در سال ۱۹۳۸ بی‌نی[۱۳] و

[1] . Ratio of supersaturation
[2] .Hertz
[3] .Knudsen
[4] .Henderson
[5] .Stodola
[6] .Bendeman
[7] .Callender
[8] .Wilson line
[9] .Martin
[10] .Yellot
[11] .Retta liata
[12] .Holland
[13] .Binnie

وودز[۱] و همچنین بی نی وگرین[۲] (۱۹۳۴) توزیع فشار محوری در جریان دوفازی بخار- مایع را در طول شیپوره همگرا- واگرا اندازه‌گیری کردند.

در سال ۱۹۴۲ برای اولین بار نظریه جوانه زایی با معادلات دینامیک گاز توسط اسواتیچ[۳] ترکیب شد. او روش را برای چند نوع جریان چگالش آب داخل نازل‌ها، هم با بخار خالص و هم با هوای اتمسفریک به کاربرد و اظهار داشت که توافق خوبی با مشاهدات تجربی حاصل شده است.

همزمان با پیشرفت بیشتر توربین‌های بخار و استفاده وسیع‌تر از آنها، پدیده چگالش و حضور فاز مایع در طبقات کم‌فشار توربین بصورت یکی از مشکلات اساسی در آمد. این پدیده مزاحم باعث خوردگی و فرسایش پره‌های توربین می‌شد، اما پس از جنگ جهانی دوم با معرفی سیکل باز گرم‌کن[۴] این مشکلات به طور موقت کمتر شدند. با توسعه طبقات بیشتر در توربین و ساختار تصاعدی واحدهای بزرگ‌تر و همچنین افزایش سرعت پره، یک تجدیدنظر جالب در مشکلات ناشی از حضور رطوبت به وجود آمد. جرماسی[۵] [۴] (۱۹۶۵)، پورینگ[۶] [۵] (۱۹۶۵)، هیل[۷][۶] (۱۹۶۶)، پوزیرسکی[۸][۷] (۱۹۶۹)، وگنر[۹] (۱۹۶۹)، کمپبل[۱۰] و باختر[۱۱] [۸] (۱۹۷۰)، بارچدروف[۱۲] [۹] (۱۹۷۰)، یوسیف[۱۳] و کمپبل [۱۰](۱۹۷۲)، باختر، تابمن[۱۴]، رایلی[۱۵] و یانگ[۱۶][۱۱] (۱۹۷۵)، موزز[۱۷] و استین[۱۸][۱۲] (۱۹۸۷) و غیره از جمله محققانی هستند که میدان جریان را مورد بررسی و مطالعه قرار داده‌اند.

مطالعات بر روی جریان چگالشی در زمینه‌های مختلفی ادامه پیدا کرده است. یانگ[۱۳] (۱۹۹۲) به

---

1 .Woods
2 .Green
3 .Oswatitsch
4 .Reheat cycle
5 .Gyarmathy
6 .Pouring
7 .Hill
8 .Puzyrewski
9 .Wegener
10 .Compbell
11 .Bakhtar
12 .Barschdroff
13 .Yousif
14 .Tabman
15 .Ryley
16 .Young
17 .Moses
18 .Stein